



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

DISTRIBUIÇÃO DOS SOLOS ASSOCIADOS AO CULTIVO DE CAFÉS
DE QUALIDADE ESPECIAL NA SERRA DA MANTIQUEIRA
MINEIRA

AURÉLIO ALVES AMARAL CHAVES

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

BRASÍLIA/DF
JULHO/2016



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

DISTRIBUIÇÃO DOS SOLOS ASSOCIADOS AO CULTIVO DE CAFÉS
DE QUALIDADE ESPECIAL NA SERRA DA MANTIQUEIRA
MINEIRA

AURÉLIO ALVES AMARAL CHAVES

ORIENTADORA: MARILUSA PINTO COELHO LACERDA
CO-ORIENTADORA: HELENA MARIA RAMOS ALVES

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

PUBLICAÇÃO: 048D/2016

BRASÍLIA/DF
JULHO/2016



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

DISTRIBUIÇÃO DOS SOLOS ASSOCIADOS AO CULTIVO DE CAFÉS
DE QUALIDADE ESPECIAL NA SERRA DA MANTIQUEIRA
MINEIRA

AURÉLIO ALVES AMARAL CHAVES

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO
DO GRAU DE DOUTOR EM AGRONOMIA.

APROVADA POR:

MARILUSA PINTO COELHO LACERDA, Professora Associada III, Dra. (Universidade de Brasília – UnB)
(ORIENTADORA) CPF: 434.760.586-20 E-mail: marilusa@unb.br

SEBASTIÃO ALBERTO DE OLIVEIRA, Pesquisador Associado, Dr. (Universidade de Brasília – UnB)
(EXAMINADOR INTERNO) CPF: 052.361.771-20 E-mail: saoliveira1949@gmail.com

TAIRONE PAIVA LEÃO, Professor Adjunto, Dr. e Ph.D. (Universidade de Brasília - UnB)
(EXAMINADOR INTERNO) CPF: 713.262.271-49 E-mail: tleao@unb.br

RENATO FONTES GUIMARÃES, Professor Adjunto, Dr. (Universidade de Brasília - UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO) CPF: 760.804.637-68 E-mail: renatofg@unb.br

EDSON EYJI SANO, Pesquisador, PhD, (Embrapa CPAC)
(EXAMINADOR EXTERNO) CPF: 034.617.098-06 E-mail: edson.sano@gmail.com

BRASÍLIA/DF, 29 DE JULHO DE 2016.

FOLHA CATALOGRÁFICA

Chaves, Aurélio Alves Amaral.

Distribuição dos Solos Associados ao Cultivo de Cafés de Qualidade Especial na Serra da Mantiqueira Mineira. / Aurélio Alves Amaral Chaves; orientação de Marilusa Pinto Coelho Lacerda. – Brasília, 2016.

190 p. : il.

Tese de Doutorado (D) – Universidade de Brasília / Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2016.

1. Relações solo-paisagem. 2. Pedomorfogeologia. 3. Curvatura. 4. Serra da Mantiqueira. 5. Lógica *fuzzy*.

I. Lacerda, M.P.C. II. Doutora.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CHAVES, A. A. A. Distribuição dos Solos Associados ao Cultivo de Cafés de Qualidade Especial na Serra da Mantiqueira Mineira. Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília - Brasília, 2016; 190 p. Tese de Doutorado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Aurélio Alves Amaral Chaves

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Distribuição dos Solos Associados ao Cultivo de Cafés de Qualidade Especial na Serra da Mantiqueira Mineira.

GRAU: DOUTOR.

ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.

Nome: Aurélio Alves Amaral Chaves

CPF: 710.396.271-53

Endereço: SQSW 504, Bloco I, Aptº 609, Setor Sudoeste. Brasília/DF

Tel. (061) 3522-5654

E-mail: aaa.chaves@hotmail.com

Aos meus pais, irmãos e sobrinho pelo incentivo durante toda minha vida, pelo amor, carinho e compreensão nos momentos de ausência.

À Mariella, minha esposa e companheira, por todo o amor e apoio nas situações mais difíceis. Agradeço por você fazer parte da minha vida e não existem palavras para descrever toda minha gratidão e felicidade ao seu lado.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Professora Dra. Marilusa Pinto Coelho Lacerda (Universidade de Brasília – UnB), que me incentivou desde a graduação, por todos os ensinamentos, motivação, conversas, pela tranquilidade transmitida e exemplo de profissional e pessoa.

À minha co-orientadora Dra. Helena Maria Ramos Alves (Embrapa Café), pela maravilhosa receptividade em Lavras, pelo suporte, auxílio e dedicação durante os trabalhos de campo e em todos os momentos necessários.

Ao Professor Dr. Flávio Meira Borém (Universidade Federal de Lavras - UFLA), pelo suporte e apoio para realização da pesquisa.

À Dra. Inara Oliveira Barbosa (Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM), pela amizade e por toda a ajuda e aprendizado durante o mestrado, o doutorado e a minha carreira profissional.

À Maria Angélica e Marcela, minha sogra e cunhada, por terem me acolhido na nova família e por todo o apoio e torcida em todos os momentos desta caminhada.

Ao mestrando Daniel Fernando Costa do Prado (Universidade Federal de Lavras - UFLA), pela grande ajuda nas atividades de campo.

Ao Ms. Manuel Pereira de Oliveira Junior (Universidade de Brasília – UnB), pela amizade, incentivo e disponibilidade sempre que necessário.

Aos meus colegas de trabalho, pelo incentivo, companheirismo e apoio durante as ausências necessárias para o desenvolvimento do doutorado.

Aos órgãos financiadores dos projetos de pesquisa ao qual este trabalho encontra-se associado:

- Consórcio Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento do Café - CNPD/Café, gerenciado pela Embrapa-Café e coordenado pela Dra. Helena Maria Ramos Alves (Embrapa Café), o qual financiou o projeto “*Distribuição Espacial e Padrões Ambientais dos Cafés Especiais da Microregião da Serra da Mantiqueira de Minas Gerais, por meio de Processamentos Geocomputacionais*”;
- Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA e Secretaria de Defesa Agropecuária – DAS, que por meio do Edital CNPq/MAPA/SDA N° 064/2008 financiou o projeto “*Protocolo de Identidade, Qualidade e Rastreabilidade para Embasamento da Indicação Geográfica dos Cafés da Mantiqueira*”, coordenado pelo Dr. Flávio Meira Borém (Universidade Federal de Lavras - UFLA).

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIACÕES

APROCAM – Associação dos Produtores de Café da Mantiqueira

AD – rvores de Decisão

BSCA – *Brazil Specialty Coffee Association*

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

DO – Denominação de Origem

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FEAM - Fundação Estadual de Meio Ambiente

FAO - *Food and Agriculture Organization*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IG – Indicação Geográfica

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial

IP – Indicação de Procedência

MDS – Mapeamento Digital de Solos

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDT – Modelo Digital de Terreno

RNA – Redes Neurais Artificiais

RLM – Regressão Logística Múltipla

SiBCS - Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SCAA – *Coffee Association of América*

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

UM – Unidade de Mapeamento

UTM – Sistema Universal Transverso de Mercator

RESUMO GERAL

A utilização do solo de forma sustentável depende do conhecimento de seus atributos e sua distribuição na paisagem, porém, no Brasil, os levantamentos de solos detalhados são escassos, impossibilitando um planejamento racional e ocasionando a degradação desse recurso e a obtenção de rendimentos abaixo do potencial agropecuário das terras. Um dos motivos da carência de informações sobre os solos do território brasileiro é a sua grande extensão territorial, onde a execução de levantamentos pedológicos tradicionais em escalas mais detalhadas apresentam custo elevado. Torna-se, então, necessária a utilização de novas tecnologias aliadas aos levantamentos convencionais. Dentre os produtos agrícolas brasileiros, destaca-se o café, responsável por um setor economicamente importante e gerador de renda e empregos, uma vez que o Brasil é o maior produtor e exportador de café no mundo. Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo caracterizar os solos associados à cultura cafeeira de alta qualidade sensorial e estabelecer o modelo de distribuição desses solos no município de Carmo de Minas, MG, representativo da Microregião da Serra da Mantiqueira Mineira, região tradicionalmente conhecida pela produção de cafés de alta qualidade. Por meio de atividades de campo, foram selecionados perfis pedológicos representativos, que foram devidamente caracterizados e classificados no SiBCS. Os parâmetros morfométricos associados à ocorrência das classes caracterizadas de solos, como declividade, hipsometria e curvatura foram verificados a fim de estabelecer as relações pedomorgeológicas da área de estudo. Foi observado que os Latossolos desenvolvidos em épocas geológicas anteriores, em superfícies geomorfológicas de aplainamento, encontram-se preservados nas encostas convexas, com classes de declividade de até 45%. Em classes de declividade variando de 45 a 75%, nas porções do relevo de curvatura transicional convexo-côncava, ocorrem Nitossolos latossólicos, e quando a declividade supera os 75%, com desenvolvimento de relevo côncavo, verifica-se a ocorrência de Cambissolos. A associação dos solos com a cultura dos cafés de alta qualidade

está relacionada à elevada evolução e profundidade destes solos em relevos acidentados e às características físicas latossólicas preservadas, que permitem o desenvolvimento da cafeicultura. A ocorrência comum de horizonte A húmico, de elevadas espessuras, também contribuem física e quimicamente à cultura do café na região. Com base no modelo elaborado da distribuição dos solos nas áreas cultivadas com cafés de qualidade no município de Carmo de Minas, representativo da Serra da Mantiqueira Mineira, foi realizado o mapeamento digital dos solos com a utilização da lógica *fuzzy*, por meio do programa ArcGIS.

Palavras-chave: Relações solo-paisagem, Pedomorfogeologia, Curvatura, Serra da Mantiqueira, Lógica *fuzzy*.

GENERAL ABSTRACT

The sustainable soil use relies on the available knowledge regarding its features and its distribution over the landscape. In Brazil, few soil studies have appeared to this day. Such gap precludes rational planning and entails degradation and suboptimal economic gains in terms of agricultural and livestock potential. One reason for the lack of information on the Brazilian territory soils is its large territory, where the execution of soil traditional surveys in more detailed scales have a high cost. Thus, it is necessary to couple the new technologies with conventional research. Coffee is one of Brazil's main agricultural products, accounting for an important economic sector in terms of income and jobs, and the country is the world's leading coffee producer and exporter. Bearing in mind such context, this study seeks to characterize the soils used to produce high quality coffee, and to present a soil distribution model covering the municipality of Carmo de Minas, as a sample of the micro-region of Serra da Mantiqueira (Mantiqueira Mountains), state of Minas Gerais – a region known for its high quality coffee. Field activities led to selecting the significant pedological profiles, which were characterized and typified according to the Brazilian Soil Classification System (SiBCS). The study assessed

morphometric parameters such as declivity, hypsometry and curvature in relation to the occurrence of the categorized soil classes, so their pedomorphogeological relations could be examined. Hapludox from previous epochs in geomorphological flatlands have been preserved in convex slopes with a declivity of up to 45%; Oxic Hapludult occur in transitional convex-concave terrains within a declivity range of 45-75%; and Hapludept occur in concave landforms where declivity rises above 75%. The linkage between these soils and the production of quality coffee is related to their high level of evolution and depth in rugged terrains, and to their preserved oxic features, which facilitate the establishment of coffee crops. The frequent occurrence of thick umbric horizons also contributes physically and chemically to coffee crops in this region. Based on its soil distribution model for quality coffee areas in Carmo de Minas, the study applied *fuzzy* logic via ArcGIS and digitally mapped the soils of the region.

Keywords: Soil-landscape relations, Pedomorphogeology, Curvature, Serra da Mantiqueira, *Fuzzy* logic.

SUMÁRIO

1.	CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	21
1.1	INTRODUÇÃO.....	21
1.2	OBJETIVOS.....	24
1.2.1	Objetivo Geral.....	24
1.2.2	Objetivos Específicos	25
1.3	ESTRUTURA DA TESE	25
1.4	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26
2.	CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO	29
2.1	REFERENCIAL TEÓRICO.....	29
2.1.1	Cultura do Café.....	29
2.1.2	Importância da Cultura do Café	32
2.1.3	Cafés Especiais e Qualidade da Bebida	33
2.1.4	Geotecnologias Aplicadas à Atividade Cafeeira	35
2.1.5	Mapeamento Digital de Solos - MDS	37
2.1.5.1	Redes Neurais Artificiais - RNA	41
2.1.5.2	Árvores de Decisão - AD.....	42
2.1.5.3	Regressões Logísticas Múltiplas - RLM.....	45
2.1.5.4	Regressão Linear Múltipla - RLM	46
2.1.5.5	Lógica <i>Fuzzy</i>	47
2.1.5.6	Pesos de evidência	48
2.1.5.7	Krigagem.....	49
2.2	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
3.	CAPÍTULO 3 – ÁREA DE ESTUDO	61
3.1	ÁREA DE ESTUDO	61
3.1.1	Localização da Área de Estudo	61
3.1.2	Caracterização da Área de Estudo.....	62
3.1.2.1	Clima	62
3.1.2.2	Vegetação	62
3.1.2.3	Evolução Geológica	64

3.1.2.4	Geologia Atual	66
3.1.2.5	Geomorfologia	68
3.1.2.6	Solos.....	69
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS DA ÁREA ESTUDADA	71
3.2.1	Atividades de Campo - Primeira e Segunda Etapa	71
3.2.2	Atividades de Campo – Terceira Etapa.....	80
3.2.2.1	Caracterização dos solos da área-piloto norte - A	81
3.2.2.2	Caracterização solos da área-piloto central – B.....	87
3.2.2.3	Caracterização dos solos da área-piloto central - C.....	92
3.2.2.4	Caracterização dos perfis pedológicos da área-piloto D.....	100
3.2.2.5	Caracterização dos perfis pedológicos da área-piloto E.....	106
3.3	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
4.	CAPÍTULO 4 - DISTRIBUIÇÃO DOS SOLOS ASSOCIADOS AO CULTIVO DE CAFÉS ESPECIAIS NA SERRA DA MANTIQUEIRA MINEIRA, CARMO DE MINAS, MG	115
4.1	INTRODUÇÃO.....	117
4.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	119
4.2.1	Localização da área de estudo	119
4.2.2	Caracterização da área de estudo	120
4.2.2.1	Clima	120
4.2.2.2	Evolução geológica e geomorfológica	120
4.2.2.3	Solos.....	122
4.2.3	Levantamento de dados secundários	123
4.2.4	Atividades de campo.....	123
4.2.5	Análises laboratoriais	127
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	128
4.4	CONCLUSÕES	139
4.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	140
5.	CAPÍTULO 5 - MAPEAMENTO DIGITAL DOS SOLOS ASSOCIADOS AO CULTIVO DE CAFÉS ESPECIAIS NA SERRA DA MANTIQUEIRA MINEIRA	145
5.1	INTRODUÇÃO.....	147
5.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	149

5.2.1	Caracterização da Área de Estudo.....	149
5.2.2	Caracterização do meio físico de Carmo de Minas, MG	150
5.2.2.1	Clima	150
5.2.2.2	Geologia atual e evolução geológica-geomorfológica	150
5.2.2.3	Solos.....	152
5.2.3	Modelo de distribuição dos solos de Carmo de Minas, MG	152
5.2.4	Estabelecimento das relações pedomorfogeológicas de Carmo de Minas, MG	154
5.2.5	Aplicação da lógica <i>fuzzy</i> no mapeamento digital dos solos associados ao café de qualidade de Carmo de Minas, MG	156
5.2.5.1	Banco de Dados	156
5.2.5.2	Inferência <i>Fuzzy</i>	159
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	160
5.3.1	Mapas de pertinência <i>fuzzy</i>	161
5.3.2	Mapa digital de solos associados ao cultivo de cafés de qualidade.....	165
5.3.3	Validação do mapeamento digital de solos	167
5.4	CONCLUSÕES	179
5.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	180
6.	CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	187
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	187
6.2	RECOMENDAÇÕES	188

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPITULO 3 - ÁREA DE ESTUDO

Figura 1 - Localização da área de estudo - Município de Carmo de Minas, MG.....	61
Figura 2 – Imagem de satélite Pléíades de 2015 do Município de Carmo de Minas, MG, mostrando os remanescentes da Mata Atlântica.	63
Figura 3 - Principais feições do Paleógeno. Onde: Bacias tafrogenéticas: 1 - Rio das Mortes, 2 - Aiuruoca, 3 - São João da Barra, 4 - Guanabara e Itaboraí, 5 - Rio Santana, 6 - Paty dos Alferes, 7 - Volta Redonda, 8 - Serra da Bocaina, 9 - Resende, 10 - Taubaté, 11 - São Paulo, 12 - Sete Barras, 13 - Cananéia e Pariqueira-Açu, 14 – Curitiba (Fonte: Hasui, 2010).	65
Figura 4 - Mapa geológico da área de estudo – Município de Carmo de Minas, MG (Fonte: Trouw et al., 2007).....	67
Figura 5 - Mapa de solos da área de estudo – Município de Carmo de Minas, MG (Fonte: FEAM, 2010).	70
Figura 6 - Localização dos perfis de solos da segunda etapa - Município de Carmo de Minas, MG.	72
Figura 7 - Perfil 1 - LVw: Latossolo Vermelho Ácrico típico.....	77
Figura 8 - Perfil 3: LVAd: Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico húmico.	77
Figura 9 - Perfil 4 - LVAd: Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico húmico.	78
Figura 10 - Perfil 6 - NVd: Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico.	78
Figura 11 - Perfil 8 - NVd: Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico.	78
Figura 12 - Perfil 9 - CXbd: Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico.....	78
Figura 13 - Perfil 11 - NVdf: Nitossolo Vermelho Distroférrico latossólico húmico.	79
Figura 14 - Perfil 12 – NVd: Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico.	79
Figura 15 - Perfil 2 - LVd: Latossolo Vermelho Distrófico típico.	79
Figura 16 - Localização dos perfis de solos avaliados nas áreas-piloto da terceira etapa de campo, município de Carmo de Minas, MG.....	80
Figura 17 - Localização dos perfis de solos avaliados nas áreas-piloto norte – A na terceira etapa de campo, município de Carmo de Minas, MG.....	82
Figura 18 - Perfil 1: Latossolo Vermelho Distrófico típico.....	82
Figura 19 - Perfil 3: Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico.	83
Figura 20 - Perfil 6: Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico.	83
Figura 21 - Localização dos pontos de observação dos solos da Terceira Campanha. Área-Piloto B - Município de Carmo de Minas, MG.....	88

Figura 22 - Perfil 7: Latossolo Vermelho Ácrico típico.	89
Figura 23 - Perfil 9: Nitossolo Vermelho Distrófico típico.	89
Figura 24 - Localização dos pontos de observação dos solos da Terceira Campanha. Área-Piloto C - Município de Carmo de Minas, MG.....	93
Figura 25 - Perfil 11: Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico húmico.....	94
Figura 26 - Perfil 12: Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico.....	94
Figura 27 - Perfil 13: Latossolo Vermelho Ácrico húmico.	95
Figura 28 - Perfil 17: Nitossolo Háplico Distrófico típico.	95
Figura 29 - Perfil 18: Nitossolo Vermelho Distrófico úmbrico.	96
Figura 30 - Localização dos pontos de observação dos solos da Terceira Campanha. Área-Piloto D - Município de Carmo de Minas, MG.	101
Figura 31 - Perfil 19: Latossolo Vermelho Distrófico típico.	102
Figura 32 - Perfil 20: Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico.	102
Figura 33 - Perfil 21: Cambissolo Háplico Tb Distrófico úmbrico.	103
Figura 34 - Localização dos pontos de observação dos solos da Terceira Campanha. Área-Piloto E - Município de Carmo de Minas, MG.....	107
Figura 35 - Perfil 24: Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico úmbrico.	107
Figura 36 - Perfil 25: Nitossolo Vermelho Distroférrico latossólico.....	108
Figura 37 - Perfil 26: Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico.	108

CAPITULO 4 - DISTRIBUIÇÃO DOS SOLOS ASSOCIADOS AO CULTIVO DE CAFÉS ESPECIAIS NA SERRA DA MANTIQUEIRA MINEIRA, CARMO DE MINAS, MG

Figura 1 - Localização da área de estudo - Município de Carmo de Minas, MG.....	119
Figura 2 – Localização dos perfis de caracterização dos solos (segunda e terceira campanhas de campo), no município de Carmo de Minas, MG.....	124
Figura 3 – (a) Distribuição dos perfis de solos descritos em curvo-sequências nas três áreas-piloto do Município de Carmo de Minas, MG; (b) curvo-sequência representativa da distribuição dos solos na área piloto na porção central do município de Carmo de Minas, MG.	125
Figura 4 – (a) Distribuição dos perfis pedológicos de topo nas áreas-piloto do município de Carmo de Minas, MG; (b) Localização detalhada do perfil pedológico representativo das áreas aplainadas de topo - área-piloto da porção central (PTC) do Município de Carmo de Minas, MG.	126

CAPITULO 5 - MAPEAMENTO DIGITAL DOS SOLOS ASSOCIADOS AO CULTIVO DE CAFÉS ESPECIAIS NA SERRA DA MANTIQUEIRA MINEIRA

Figura 1 - Localização da área de estudo, correspondente ao município de Carmo de Minas, MG.	149
Figura 2 - Modelo digital de elevação (MDE) do município de Carmo de Minas.	157
Figura 3 - Mapa de classes hipsométricas do município de Carmo de Minas.	157
Figura 4 - Mapa de classes de declividade do município de Carmo de Minas.	158
Figura 5 - Mapa de classes de curvatura do município de Carmo de Minas.	158
Figura 6 - Mapas de pertinência <i>fuzzy</i> do município de Carmo de Minas, MG: a) Cambissolo Háplico; b) Latossolo Vermelho-Amarelo + Latossolo Vermelho (áreas aplainadas de topo).	163
Figura 7 - Mapas de pertinência <i>fuzzy</i> do município de Carmo de Minas, MG: a) Latossolo Vermelho + Latossolo Vermelho-Amarelo + Nitossolos Vermelhos latossólicos, com inclusões da Nitossolo Háplico; b) Latossolo Vermelho + Latossolo Vermelho-Amarelo.	164
Figura 8 - Mapas de pertinência <i>fuzzy</i> da classe de Nitossolo Vermelho latossólico do município de Carmo de Minas, MG.	165
Figura 9 - Mapa dos solos associados ao cultivo de cafés de alta qualidade do município de Carmo de Minas, MG.	166
Figura 10 – Detalhamento do mapa dos solos associados ao cultivo de cafés de alta qualidade da área-piloto norte - A, município de Carmo de Minas, MG.	168
Figura 11 – Perfil 1: Latossolo Vermelho Distrófico típico.	169
Figura 12 – Perfil 3: Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico.	169
Figura 13 – Perfil 6: Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico.	170
Figura 14 – Detalhamento dos solos associados ao cultivo de cafés de alta qualidade da curvo-sequência da área-piloto central - C, município de Carmo de Minas, MG.	171
Figura 15 – Perfil 11: Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico húmico.	171
Figura 16 – Perfil 12: Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico.	172
Figura 17 – Perfil 13: Latossolo Vermelho Ácrico húmico.	172
Figura 18 – Perfil 17: Nitossolo Háplico Distrófico típico.	173
Figura 19 – Perfil 18: Nitossolo Vermelho Distrófico úmbrico.	173
Figura 20 - Detalhamento do mapa dos solos associados ao cultivo de cafés de alta qualidade da curvo-sequência da área-piloto central - D, município de Carmo de Minas, MG.	174
Figura 21 – Perfil 19: Latossolo Vermelho Distrófico típico.	175

Figura 22 – Perfil 20: Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico.	175
Figura 23 – Perfil 21: Cambissolo Háptico Tb Distrófico úmbrico.....	176
Figura 24 – Detalhamento do mapa dos solos associados ao cultivo de cafés de alta qualidade da curvo-sequência da área-piloto sul - E, município de Carmo de Minas, MG.	177
Figura 25 – Perfil 24: Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico úmbrico.....	177
Figura 26 – Perfil 25: Nitossolo Vermelho Distroférico latossólico.	178
Figura 27 – Perfil 26: Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico.....	178

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO

Tabela 1 - Origem e distribuição das espécies de cafeeiros pertencentes aos gêneros <i>Coffea</i> e <i>Psilanthus</i> e espécies presentes em coleções de germoplasma no Brasil (Fonte: Carvalho, 2008).	31
--	----

CAPÍTULO 3 – ÁREA DE ESTUDO

Tabela 1 - Descrição das unidades de mapeamento identificadas no mapeamento de solos desenvolvido pela FEAM (2010).	70
Tabela 2 - Caracterização química dos solos avaliados da segunda etapa de campo na área de estudo, Município de Carmo de Minas, MG.....	73
Tabela 3 - Caracterização física dos solos avaliados na segunda campanha de campo na área de estudo, Município de Carmo de Minas, MG.	75
Tabela 4 - Teores de óxidos constituintes extraídos pelo ataque sulfúrico dos solos avaliados na segunda campanha de campo na área de estudo, Município de Carmo de Minas, MG.....	76
Tabela 5 - Classificação dos solos identificados na Segunda Campanha realizada na área de estudo – Município de Carmo de Minas, MG.....	77
Tabela 6 - Características morfológicas dos solos estudados na área-piloto A – Município de Carmo de Minas, MG.....	84
Tabela 7 - Características físicas dos solos estudados na área-piloto A – Município de Carmo de Minas, MG.	85
Tabela 8 - Teores de óxidos constituintes extraídos pelo ataque sulfúrico dos solos estudados na área-piloto A – Município de Carmo de Minas, MG.	85
Tabela 9 - Caracterização química dos solos estudados na área-piloto A – Município de Carmo de Minas, MG.	86
Tabela 10 - Características morfológicas dos solos estudados na área-piloto B – Município de Carmo de Minas, MG.....	90
Tabela 11 - Caracterização química dos solos estudados na área-piloto B – Município de Carmo de Minas, MG.	91
Tabela 12 - Características física dos solos estudados na área-piloto B – Município de Carmo de Minas, MG.	92
Tabela 13 - Teores de óxidos constituintes extraídos pelo ataque sulfúrico dos solos estudados na área-piloto B – Município de Carmo de Minas, MG.	92

Tabela 14 - Características morfológicas dos solos estudados na área-piloto C – Município de Carmo de Minas, MG.....	96
Tabela 15 - Teores de óxidos constituintes extraídos pelo ataque sulfúrico dos solos estudados na área-piloto C – Município de Carmo de Minas, MG.	98
Tabela 16 - Caracterização química dos solos estudados na área-piloto C – Município de Carmo de Minas, MG.	99
Tabela 17 - Características física dos solos estudados na área-piloto C – Município de Carmo de Minas, MG.	100
Tabela 18 - Características morfológicas dos solos estudados na área-piloto - D – Município de Carmo de Minas, MG.....	103
Tabela 19 - Teores de óxidos constituintes extraídos pelo ataque sulfúrico dos solos estudados na área-piloto D – Município de Carmo de Minas, MG.	104
Tabela 20 - Caracterização química da curvo-sequência estudada na área-piloto - D – Município de Carmo de Minas, MG.	105
Tabela 21 - Características física dos solos estudados na área-piloto D – Município de Carmo de Minas, MG.	106
Tabela 22 - Características morfológicas dos solos estudados na área-piloto E – Município de Carmo de Minas, MG.....	109
Tabela 23 - Teores de óxidos constituintes extraídos pelo ataque sulfúrico dos solos estudados na área-piloto - E – Município de Carmo de Minas, MG.	110
Tabela 24 - Características física dos solos estudados na área-piloto - E – Município de Carmo de Minas, MG.	110
Tabela 25 - Caracterização química dos solos estudados na área-piloto - E – Município de Carmo de Minas, MG.....	111

CAPÍTULO 4 - DISTRIBUIÇÃO DOS SOLOS ASSOCIADOS AO CULTIVO DE CAFÉS ESPECIAIS NA SERRA DA MANTIQUEIRA MINEIRA, CARMO DE MINAS, MG

Tabela 1 - Características morfológicas do LVAd do PTC, representativo dos solos das áreas aplainadas de topo, e dos solos da curvo-sequência estudada, Carmo de Minas, MG.	128
Tabela 2 - Características físicas do LVAd do PTC, representativo dos solos das áreas aplainadas de topo e dos solos da curvo-sequência estudada, Carmo de Minas, MG.	132
Tabela 3 - Teores de óxidos constituintes do LVAd do PTC, representativo dos solos das áreas aplainadas de topo e dos solos da curvo-sequência estudada, Carmo de Minas, MG.	134

Tabela 4 - Caracterização química do LVAd do PTC, representativo dos solos das áreas aplainadas de topo e dos solos da curvo-sequência estudada, Carmo de Minas, MG. 135

CAPÍTULO 5 - MAPEAMENTO DIGITAL DOS SOLOS ASSOCIADOS AO CULTIVO DE CAFÉS ESPECIAIS NA SERRA DA MANTIQUEIRA MINEIRA

Tabela 1 - Peso dos atributos morfométricos do terreno associados às classes de solos de ocorrência no município de Carmo de Minas, MG..... 160

1. CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de dimensões continentais, capaz de produzir alimentos de forma racional e sustentável. No entanto, em função do grande crescimento da população e aumento da demanda por alimentos e fontes energéticas renováveis, os solos estão sendo, muitas vezes utilizado de maneira indiscriminada. O uso intensivo e sustentável dos solos demanda conhecimento detalhado de suas características e propriedades, de forma que se estabeleça um planejamento racional com definição de técnicas de manejo prioritárias à sua exploração e conservação (Demattê et al., 2011).

Para a correta utilização dos solos é fundamental o conhecimento de seus atributos e sua distribuição na paisagem, porém, segundo Giasson et al. (2006), os levantamentos de solos existentes no Brasil não estão em escala adequada, ocasionando a má utilização dos recursos naturais, degradação dos solos e rendimentos abaixo do potencial agropecuário regional. Segundo Coelho e Giasson (2010), mapas pedológicos são fontes de informações primordiais para a execução de planejamentos de uso e manejos adequados dos solos e o Brasil possui grande parte de seu território coberto por mapas de solos pouco detalhados, com escala de 1:1.000.000, produzidos pelo projeto Radambrasil.

Pode-se considerar que um dos motivos da carência de informações sobre os solos utilizados pelas atividades agrícolas no Brasil é consequência da sua grande extensão territorial, que causa um grande custo em levantamentos tradicionais. Para isso torna-se necessária a utilização de tecnologias modernas aliadas aos levantamentos convencionais de solos, de forma a possibilitar a geração de informações em escalas adequadas para auxiliar o planejamento das diversas atividades agropecuárias.

Nesse sentido, são fundamentais os estudos que forneçam as informações necessárias para a produção econômica e ecologicamente sustentáveis das atividades agrícolas brasileiras. Estas constituem um dos principais setores econômicos do país, uma vez que contribui positivamente ao Produto Interno Bruto nacional e coloca o Brasil como um dos líderes mundiais de produção e exportação de vários produtos agropecuários (França et al., 2009; IBGE, 2012).

E diante deste contexto, a atividade agrícola no Brasil é crescente e intensa, dependente cada vez mais de mapeamentos pedológicos mais detalhados que permitam o desenvolvimento de uma agricultura sustentável. Dentre os produtos agrícolas brasileiros, o café possui um elevado destaque, pois o setor cafeeiro constitui uma importante atividade econômica geradora de renda e emprego. Além disso, o Brasil é o maior produtor e exportador de café do mundo (Brandão et al., 2012; Coelho, 2005; Reis, 2010), além do segundo posto como país consumidor no mercado internacional (Coelho, 2005).

Segundo Brandão et al. (2012), estatísticas da FAO (*Food and Agriculture Organization*) mostram que o Brasil é o maior produtor de café, seguido pelo Vietnã, Colômbia, Indonésia e Etiópia, além de ser o maior exportador. Estas características indicam a importância econômica do café para o agronegócio nacional, além de gerar renda e emprego para milhares de pessoas dos países produtores.

Minas Gerais destaca-se no cenário brasileiro com a maior contribuição na cafeicultura brasileira, com uma participação de 51,59% do café produzido no país. E a região Sul de Minas foi responsável pela produção de aproximadamente 48% da produção estadual e 25% da produção nacional da safra de 2015 (CONAB, 2015). Essa importante mesorregião mineira, destaca-se, pela elevada qualidade sensorial dos cafés produzidos, a cafeicultura da região da Serra da Mantiqueira Mineira.

Ressalta-se ainda que, segundo Vargas (2008), os consumidores buscam por produtos com qualidade e procedências garantidas, sendo que essa busca é motivada por incertezas

relacionadas às crises alimentares e alimentos geneticamente modificados. Segundo o autor a referência de origem seria um critério de agregação de valor, diferenciação e de fortalecimento da imagem de produtos e regiões, sendo representada pela denominação de origem, além de se tratar de uma estratégia competitiva desenvolvida com base em identidades territoriais. Reis (2015) afirma que a Indicação Geográfica – IG foi construída por meio da história, na medida em que produtores e comerciantes apresentavam produtos cujas qualidades podiam ser atribuídas à sua origem. Segundo o autor ocorreu a valorização dos produtos através do vínculo de qualidade, reputação ou outras características à região produtora.

A Lei nº 9.279 de 14 de maio de 1996 prevê que a Indicação de Procedência – IP e Denominação de Origem – DO, constituem as duas modalidades de Indicação Geográfica legalmente instituídas. Em seus artigos 177 e 178 são descritos que a IP trata do nome geográfico do país, cidade, região ou localidade de seu território, que tenha tornado conhecido como centro de extração, produção ou fabricação de determinado produto ou de prestação de determinado serviço. Por sua vez, a DO seria considerada como o nome geográfico de país, cidade, região ou localidade de seu território, que designe produto ou serviço cujas qualidades ou características se devam exclusiva ou essencialmente ao meio geográfico, incluídos fatores naturais e humanos (Borém, 2012).

Segundo Valente et al. (2012), no Brasil, o primeiro registro de uma IG se deu no ano de 1999, para a Região dos Vinhos Verdes, Portugal, na modalidade denominação de origem. Já a primeira IG brasileira reconhecida no País foi a Indicação de Procedência do Vale dos Vinhedos, em 2002, para vinhos tintos, brancos e espumantes. Hoje, conforme informações do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI, 2016), o Brasil possui 40 Indicações de Procedência registradas. Dentre elas estão as indicações geográficas de Indicação de Procedência (IPs) da Região do Cerrado Mineiro, registrada em 14 de abril de 2005, e Região

da Serra da Mantiqueira de Minas Gerais, registrada em 31 de maio de 2011, sendo ambas para o produto café.

A microregião da Serra da Mantiqueira Mineira já possui IG na modalidade de Indicação de Procedência – IP para os cafés de alta qualidade sensorial. Para a obtenção da IG de Denominação de Origem – DO, onde a qualidade está exclusiva ou essencialmente associada ao meio geográfico, incluindo os fatores naturais e humanos (Borém, 2012), torna-se necessário a caracterização detalhada dos recursos do meio físico, entre eles os solos.

Este trabalho encontra-se associado aos projetos de pesquisa intitulados “*Distribuição Espacial e Padrões Ambientais dos Cafés Especiais da Microregião da Serra Da Mantiqueira de Minas Gerais, por meio de Processamentos Geocomputacionais*”, coordenado pela Dra. Helena Maria Ramos Alves (Embrapa-Café) e financiado pelo Consórcio Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento do Café - CNPD/Café, gerenciado pela Embrapa-Café; e “*Protocolo de Identidade, Qualidade e Rastreabilidade para Embasamento da Indicação Geográfica dos Cafés da Mantiqueira*”, coordenado pelo Dr. Flávio Meira Borém (UFLA), financiado pelo Edital CNPq/MAPA/SDA N° 064/2008. Ambos os projetos de pesquisa visavam a busca de dados para a Indicação Geográfica na modalidade DO para os cafés de alta qualidade da Serra da Mantiqueira Mineira, e este trabalho foi responsável pela caracterização e distribuição dos solos associados ao cultivo dos cafés de alta qualidade nesta microregião.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho foi caracterizar os solos associados à cultura cafeeira de alta qualidade sensorial, assim como estabelecer o modelo de distribuição desses no município de Carmo de Minas, MG, representativo da Microregião da Serra da Mantiqueira Mineira.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os solos associados ao cultivo de cafés de alta qualidade sensorial, no Município de Carmo de Minas, representativo da Microregião da Serra da Mantiqueira Mineira.
- Estabelecer o modelo de distribuição dos solos da área de estudo, por meio do estabelecimento de relações pedomorfogeológicas, a fim de realizar o mapeamento digital de solos associados à cafeicultura no município de Carmo de Minas, MG;
- Verificar características dos solos associados à produção dos cafés de alta qualidade sensorial nesta microregião mineira, para auxiliar a caracterização dos padrões de identidade e qualidade do café da região, em processo de obtenção da Indicação Geográfica na modalidade de Denominação de Origem.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

A tese foi organizada em seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução, os objetivos do estudo e a estrutura da tese.

O segundo capítulo trata de uma revisão da literatura acerca das metodologias utilizadas no desenvolvimento do trabalho de pesquisa

O terceiro capítulo apresenta a caracterização da área de estudo, incluindo os perfis pedológicos avaliados para a compreensão da distribuição das classes de solos no município de Carmo de Minas, MG.

O quarto capítulo aborda o estabelecimento do modelo de distribuição dos solos associados ao cultivo de cafés de alta qualidade sensorial e a sua distribuição no município de Carmo de Minas, MG.

O quinto capítulo refere-se à elaboração do mapeamento digital de solos do município de Carmo de Minas, MG, associados ao cultivo de cafés especiais na Microregião da Serra da Mantiqueira mineira, elaborado com base no modelo estabelecido no quarto capítulo.

O sexto capítulo apresenta as considerações finais, com base nos resultados alcançados e principais conclusões dos capítulos anteriores e indica as recomendações para o aperfeiçoamento do trabalho e para futuros estudos relacionados a temática abordada.

1.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BORÉM, F. M. **Protocolo de identidade, qualidade e rastreabilidade para embasamento da indicação geográfica dos cafés da Mantiqueira**. In: BORÉM, F. M. (coord.). Relatório Final de Prestação de Contas. Edital CNPq/MAPA/SDA Nº 064/2008. Lavras: UFLA, 2012. 128p.
- BRANDÃO, F. S.; CEOLIN, A. C.; GIANEZINI, M.; RUVIARO, C. F.; DIAS, E. A.; BARCELLOS, J. O. J. Orientação para mercado externo do café brasileiro. **Coffee Science**, Lavras, v.7, n.3, p.275-283, 2012.
- COELHO, F. M. G. O café num outro retrato do Brasil rural: o lugar da agricultura familiar. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, Edição especial. v.26, p.9-16, 2005.
- COELHO, F. F.; GIASSON, E. Métodos para mapeamento digital de solos com utilização de sistema de informação geográfica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.10, p.2099-2106, 2010.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Café, Safra 2015 – Quarto Levantamento**. Brasília: CONAB, 2015.

- DEMATTE, J. A. M.; RIZZO, R.; BORTOLETTO, M. A. M. Método geotecnológico integrativo na caracterização de solos desenvolvidos de diferentes materiais de origem. **Bragantia**, Campinas, v.70, n.3, p.638-648, 2011.
- FRANÇA, C. G.; DEL GROSSI, M. E.; MARQUES, V. P. M. A. **O censo agropecuário 2006 e a agricultura familiar no Brasil**. Brasília: MDA, 2009. 96p.
- GIASSON, E.; INDA JUNIOR, A. V.; NASCIMENTO, P. C. Estimativa do benefício econômico potencial de dois levantamentos de solos no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.2, p.478-486, 2006.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2006**. Segunda Apuração. Brasil, Grandes Regiões e Unidade da Federação. Rio de Janeiro, 2012. 774p.
- INPI – INSTITUTO NACIONAL DE PROPRIEDADE INDUSTRIAL. **Pedidos de indicação geográfica concedidos e em andamento**. Disponível em: <http://www.inpi.gov.br/menu-servicos/indicacao-geografica/pedidos-de-indicacao-geografica-no-brasil>. Acessado em 2 jul.2016.
- REIS, P. R. **Café Arábica do plantio à colheita**/Paulo Rebelles Reis, Rodrigo Luz da Cunha. – Lavras: U.R. EPAMIG SM, 2010. 1 v., 896p.
- REIS, L. M. **Indicação Geográfica no Brasil: determinantes, limites e possibilidades**. 2015. 270f. (Tese de Doutorado em Geografia). Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA.
- VARGAS, I.C.S. **Indicações geográficas do Brasil: possibilidades para os produtores inseridos na área de proteção ambiental do Ibirapuitã- RS**. 2008. 100p. (Dissertação de Mestrado em Extensão Rural). Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, RS.

VALENTE, M. E. R.; PEREZ, R.; RAMOS, A. M.; CHAVES, J. B. P. Indicação geográfica de alimentos e bebidas no Brasil e na União Europeia. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.42, n.3, p.551-558, 2012.

2. CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1.1 Cultura do Café

Pode-se dizer que o cafeeiro é um arbusto perene, cuja altura varia entre dois e seis metros e, no estado selvagem, sem nenhum tipo de intervenção pode alcançar 10 metros de altura. O formato da copa é cilíndrico, com um ramo vertical (ortotópico) e ramificações laterais horizontais (ramos plagiotrópicos). As folhas são brilhantes e de coloração verde-escura, com formato elíptico, bordas onduladas, nervuras secundárias de pequena profundidade e domácias glabras. As inflorescências se desenvolvem na axila foliar dando origem a até quatro flores, em uma estrutura denominada de glómérulo. A coloração dos frutos pode ser amarela ou vermelha, com formato oblongo e o pergaminho envolvem duas sementes (Carvalho, 2008).

O sistema radicular dos cafeeiros é composto por uma raiz pivotante e raízes laterais. A raiz pivotante é pouco proeminente ou ausente, em razão do sistema de produção de mudas, onde é realizada a prática de cortar o fundo do recipiente para evitar a formação do “pião torto”. Esta prática causa a perda da dominância apical dessa raiz e induz a emissão das ramificações laterais. Caso seja realizada a repicagem mal feita ou aplicado um excesso de pressão durante o plantio, forçando a raiz a se dobrar, pode ocorrer também o enovelamento ou entortamento da raiz. As raízes laterais são as ramificações da raiz principal e são classificadas em axiais e laterais de superfície. As axiais se desenvolvem logo abaixo do tronco, verticalmente ao solo. As laterais de superfície são aquelas que crescem paralelamente a superfície do solo (Reis, 2010; Carvalho, 2008).

Segundo Carvalho (2008) os cafeeiros pertencem a divisão das Fanerógramas, classe Angiosperma, subclasse Eudicotiledônea, ordem Rubiales, família das Rubiáceas, tribo

Coffeae, subtribo Coffeinae, gêneros *Coffea* e *Psilanthus*. O gênero *Coffea* é composto por dois subgêneros: *Coffea* e *Baracoffea*.

Segundo Soares (2012), o café pertence à família das rubiáceas, onde uma das suas características mais visíveis está relacionada ao fato dos frutos se tornarem vermelhos quando maduros, se assemelhando à rubis.

Por sua vez, segundo Melo e Sousa (2011) o cafeeiro pertence ao Reino: *Plantae*, Divisão: *Magnoliophyta*, Classe: *Magnoliopsida*, Ordem: *Gentianales*, Família: *Rubiaceae* e Gênero: *Coffea*. Segundo os autores a família *Rubiaceae* abrange mais de 10 mil espécies agrupadas em 630 gêneros. Os cafeeiros foram reunidos em dois gêneros: o *Psilanthus* Hook e *Coffea* L. e segundo Carvalho (2008) as flores do gênero *Coffea* apresentam anteras e estigmas proeminentes e estilo longo, por sua vez as espécies pertencentes ao gênero *Psilanthus* têm estilo curto e flores com anteras e estigmas inclusos, não ultrapassando o tubo da corola.

O gênero *Coffea* se divide em quatro seções: *Eucoffea* com 24 espécies, *Marcarocoffea* com 18 espécies, *Argocoffea* com 11 espécies e *Paracoffea* com 13 espécies. A de maior importância econômica é a *Eucoffea*, onde estão as espécies mais cultivadas para o consumo (Melo e Sousa, 2011). Segundo Souza et al. (2004) o gênero *Coffea* possui mais de 90 espécies descritas, onde cerca de 25 são exploradas comercialmente e apenas quatro têm importância significativa no mercado mundial: *Coffea arabica*, conhecido como café arábica; *Coffea canephora*, conhecido como café robusta, e em menor volume *Coffea liberica* e *Coffea dewevrei*, que produzem o café libérica e o café excelsa, respectivamente. Segundo Soares (2012), as duas espécies mais conhecidas são a *Coffea arabica* e a *Coffea canephora*.

A espécie *C. arabica* é originária do sudeste da Etiópia, sudeste do Sudão e norte do Quênia, em altitudes variando entre 1.000 e 1.200 metros. A dispersão se deu por meio do Iêmen e o início da cafeicultura brasileira se deu em 1727, pela introdução de apenas três plantas (Carvalho, 2008; Reis, 2010). Segundo Reis (2010) os primeiros cafezais foram descendentes

de uma única espécie, *Coffea arabica* cv. *Arabica*, também conhecido como *Typica*. Por sua vez, a espécie de *C. canephora* é originária de uma ampla região quente, úmida, com precipitação entre 1.500 e 2.000 mm anuais, que se estende da Guiné ao Congo (Carvalho, 2008).

Tabela 1 - Origem e distribuição das espécies de cafeeiros pertencentes aos gêneros *Coffea* e *Psilanthus* e espécies presentes em coleções de germoplasma no Brasil (Fonte: Carvalho, 2008).

Região	Gênero	
	<i>Coffea</i>	<i>Psilanthus</i>
África Ocidental	<i>Coffea</i> (<i>C. canephora</i> , <i>C. humilis</i> , <i>C. klainii</i> , <i>C. liberica</i> , <i>C. dewevrei</i> , <i>C. stenophylla</i>)	<i>Afrocoffea</i> (<i>P. ebracteolatus</i>) <i>Psilanthus</i>
África Central	<i>Coffea</i> (<i>C. kapakata</i> , <i>C. ibérica</i> , <i>C. dewevrei</i> , <i>C. canephora</i> , <i>C. congensis</i> , <i>C. anthonyi</i>)	<i>Afrocoffea</i> (<i>P. ebracteolatus</i>) <i>Psilanthus</i>
África Oriental	<i>Coffea</i> (<i>C. arabica</i> , <i>C. eugenioides</i> , <i>C. racemosa</i> , <i>C. sessiliflora</i> , <i>C. salvatrix</i>)	<i>Afrocoffea</i>
Madagascar	<i>Coffea</i> (<i>C. richardii</i>) <i>Baracoffea</i>	-
Ásia e Oceania	-	<i>Afrocoffea</i> (<i>P. bengalensis</i> , <i>P. travacorensis</i>)

Segundo a Souza et al. (2004) o café arábica (*Coffea arabica* L.) é a espécie mais importante do gênero *Coffea*. É cultivado no continente americano, na África e na Ásia. Segundo os autores a bebida apresenta qualidade superior, com aroma marcante e sabor adocicado, consumida pura ou em misturas com outras espécies. As variedades de *Coffea arabica* mais difundidas no Brasil são a Catuaí e Mundo Novo, por serem apropriadas para regiões de maior altitude e de clima ameno. Além dessas variedades podemos citar também a Bourbon, Acaiá, Caturra, Catucaí, dentre outras.

Em virtude das plantas das variedades de *C. canephora* apresentarem um alto vigor vegetativo, elas são conhecidas por “Robusta”. As mais importantes do ponto de vista comercial no Brasil são as variedades Conillon, Robusta, Guarini e Apoatã (Souza et al., 2004).

Segundo Carvalho (2008), o teor de cafeína é bastante variável entre as espécies de *Coffea*, sendo as plantas de *C. canephora*. O *C. arabica*, apresenta teor médio de cafeína de 1,2% do peso seco da semente, enquanto o *C. canephora* pode atingir até 4%.

2.1.2 Importância da Cultura do Café

O café tem fundamental importância na economia brasileira, pois além da participação na receita cambial, transfere renda aos outros setores, contribui na formação de capital do setor agrícola e tem expressiva capacidade de absorção de mão-de-obra (Campos, 2005).

Historicamente, o café é estratégico para as exportações brasileiras. Mesmo perdendo importância relativa no quadro geral das receitas cambiais, o produto tem garantido ao Brasil o primeiro lugar como produtor e exportador e o segundo lugar como país consumidor no mercado internacional (Coelho, 2005). Segundo Reis (2010), o volume de café brasileiro produzido é proporcional a soma dos outros seis maiores países produtores, sendo o Brasil responsável por 30% do mercado internacional de café, perdendo como mercado consumidor apenas para os Estados Unidos. O agronegócio do café engloba cerca de 1.900 municípios, 370.000 cafeicultores, 1 milhão de trabalhadores rurais e mais de 8 milhões de brasileiros que dependem da atividade agroindustrial da cadeia do café (Khatounian e Soares-Júnior, 2005).

As espécies de café mais cultivadas no Brasil são *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora* Pierre, as quais respondem por cerca de 70% e 30% da produção mundial, respectivamente (Sales Júnior, 2006; IBGE, 2015). Dados do IBGE (2015) e CONAB (2015) informam que o

café arábica representa mais de 74% do total de café produzido no país e Minas Gerais é o maior produtor brasileiro de café arábica, com 68,5% do total esperado em 2015.

Minas Gerais destaca-se no cenário brasileiro como o maior produtor, com uma participação de 51,59% do café produzido no país. Segundo Reis (2010), em Minas Gerais a cafeicultura concentrou-se em três grandes regiões: Zona da Mata, Triângulo Mineiro e Sul de Minas. Dados da CONAB (2015) mostram que a Região Sul de Minas foi responsável pela produção de aproximadamente 48% da produção estadual e 25% da produção nacional da safra de 2015. Inserida nessa importante mesorregião mineira, destaca-se, pela elevada qualidade sensorial dos cafés produzidos, a Região da Serra da Mantiqueira.

Por sua vez a região da Serra da Mantiqueira de Minas Gerais representa a segunda Indicação Geográfica para café no Brasil. Esta indicação foi concedida pelo Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) em maio de 2011 para a APROCAM (Associação dos Produtores de Café da Mantiqueira) na modalidade Indicação de Procedência (IP). A região delimitada para a utilização da IP compreende 22 municípios sendo eles: Baependi, Brasópolis, Cachoeira de Minas, Cambuquira, Campanha, Carmo de Minas, Caxambu, Conceição das Pedras, Conceição do Rio Verde, Cristina, Dom Viçoso, Heliadora, Jesuânia, Lambari, Natércia, Olímpio Noronha, Paraisópolis, Pedralva, Pouso Alto, Santa Rita do Sapucaí, São Lourenço e Soledade de Minas (Borém, 2012). O processo de obtenção da Denominação de Origem foi solicitado pela Associação dos Produtores de Café de Carmo de Minas - APROCAM ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI, 2016).

2.1.3 Cafés Especiais e Qualidade da Bebida

O conceito de café especial está ligado ao prazer que a bebida pode proporcionar por meio de algum atributo específico, que pode estar relacionado ao processo de produção ou beneficiamento. Os principais diferenciais, que tornam um café mais valorizado, são a

qualidade e a complexidade da bebida. Quanto mais rara e exótica for a sensação de prazer e percepção sensorial proporcionada ao consumidor, mais valorizado será o café (Borém, 2012). Segundo Bressani (2007), os cafés especiais geralmente apresentam 100% de grãos arábica, produzidos com 100% de grãos cereja, devem ser considerados cafés sustentáveis, com certificação ambiental e ter nota na análise sensorial acima de 80, em uma classificação sensorial que vai de 0 a 100.

Silva (2010) descreve que a qualidade do café pode ser avaliada por defeitos (presença de grãos verdes, grão quebrados, entre outros) ou por qualidade sensorial, que avalia a amostra de café de acordo com suas características de bebida.

No Brasil, o café é classificado, tradicionalmente, pela prova de xícara, seguindo as recomendações da Instrução Normativa nº 08, de 11 de julho de 2013, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, onde segundo Ribeiro (2013) essa é uma análise subjetiva, pois poderia variar de degustador para degustador. Outro aspecto apontado pelo autor seria o fato dos procedimentos para a sua realização serem menos criteriosos, principalmente quanto à torra do café, fazendo com que esse tipo de avaliação seja empregado exclusivamente para o café commodity. Na prova de xícara a bebida é classificada como estritamente mole, mole, apenas mole, dura, riado, rio e rio zona.

Segundo Ribeiro (2013), para a avaliação de cafés especiais, são adotados os métodos de análises sensoriais descritivas. Nesses métodos os degustadores conferem notas a cada atributo sensorial da bebida, merecendo destaque aos métodos da *Specialty Coffee Association of América* (SCAA) e o da *Brazil Specialty Coffee Association* (BSCA). Segundo o autor, o método SCAA se baseia em uma análise sensorial descritiva quantitativa da bebida, realizada por provadores treinados e qualificados como Juízes Certificados de Cafés Especiais (SCAA *Certified Cupping Judges*). É utilizada a escala não estruturada de 0 a 10, com a avaliação dos

seguintes atributos: fragrância/aroma, acidez, corpo, sabor, sabor residual (finalização), doçura, uniformidade, xícara limpa (ausência de defeitos), equilíbrio (harmonia) e avaliação global.

Os cafés que apresentam nota final igual ou superior a 80 pontos, mediante avaliação sensorial pelo método SCAA ou BSCA, são considerados cafés especiais (Ribeiro, 2013).

2.1.4 Geotecnologias Aplicadas à Atividade Cafeeira

Fatores ambientais como clima, solo, relevo e orientação de vertentes são determinantes na viabilização da exploração econômica de cafezais. Tratam-se de variáveis independentes de investimento e de práticas de manejo. Dessa forma o estudo do agroecossistema cafeeiro torna-se fundamental para o planejamento e consolidação desta atividade, uma vez que as seleções de áreas adequadas ao cultivo exigem menores gastos, maximizam a capacidade produtiva e proporcionam produtos mais saudáveis (Barros, 2006).

Nesse sentido, vários autores têm realizados estudos e levantamentos de fatores ambientais relacionados à cultura do café. Pode se citar o trabalho de Bernardes et al. (2012), que elaboraram uma modelagem ambiental do parque cafeeiro do Estado de Minas Gerais em relação às variáveis morfométricas (altimetria, declividade e orientação de vertentes) e aos tipos de solo.

No município de Umuarama (PR) Trabaquini et al. (2011) utilizaram técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto para caracterização de lavouras cafeeiras relacionando variáveis físicas, como altimetria, declividade e classes de solo com o sistema cafeeiro. Moreira et al. (2010) realizaram o mapeamento das áreas de café cultivadas nos Estados de Minas Gerais e São Paulo utilizando imagens de sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento.

Já Ramirez e Junior (2009) avaliaram as correlações existentes entre os parâmetros biofísicos de plantios de café e sua resposta espectral nas imagens dos satélites Landsat-TM e

Quickbird. Os autores observaram que a porcentagem de cobertura do terreno pelas plantas de café (%COB) é o parâmetro biofísico que possui maior correlação com a resposta espectral nas bandas do visível dos satélites Quickbird e Landsat/TM e que a quantidade de sombras da plantação influenciou significativamente na resposta espectral da banda do infravermelho próximo (b4) das duas imagens avaliadas.

Barros et al. (2007) utilizaram geotecnologias para caracterizar a cafeicultura em quatro municípios do estado de Minas Gerais, mapeando as áreas de cafeicultura nos municípios de Aguanil, Boa Esperança, Campo Belo e Cristais. Foi realizada a modelagem topográfica a partir dos dados interferométricos (SRTM) e caracterizadas as áreas de cafeicultura, mapeadas em escala municipal, em relação às variáveis altimetria, declividade e orientação de vertentes. Por sua vez, Trabaquini et al. (2010) relacionaram o agrossistema cafeeiro no município de Londrina (PR), com três variáveis físicas do ambiente: altimetria, declividade e classes de solo, utilizando imagens do sensor *Thematic Mapper* (TM) a bordo do satélite Landsat-5 e técnicas de geoprocessamento.

No trabalho de Machado et al. (2010) foi realizado o mapeamento de áreas cafeeiras da Zona da Mata de Minas Gerais por meio do sensoriamento remoto, usando imagens de satélite Landsat TM e fotografias aéreas digitais não convencionais. Apesar das imagens Landsat TM não possibilitarem a delimitação e quantificação das lavouras cafeeiras da região, podem servir como referência de localização, com maior potencial de aplicação em regiões de relevo mais suave e com uma cafeicultura distribuída em lavouras mais extensas e homogêneas. Já Vieira et al. (2007) utilizaram geotecnologias para avaliar as mudanças temporais e espaciais de áreas ocupadas pela cafeicultura em quatro regiões de Minas Gerais, mediante técnicas de sensoriamento remoto e utilização de sistema de informações geográficas para avaliação espaço-temporal da dinâmica de áreas de café de Minas Gerais, propiciando uma melhor compreensão dos ambientes cafeeiros e fornecendo informação que pode subsidiar o

planejamento agrícola regional dos municípios mineiros Machado, São Sebastião do Paraíso, Três Pontas e Patrocínio.

No estudo de Souza et al. (2012) foi utilizado um Sistema de Informação Geográfica (SIG) para espacializar as variáveis, área plantada e produção de café, dos 853 municípios mineiros, no período de 1990 a 2008 e analisaram a evolução temporal da dinâmica espacial, identificando os padrões espaciais dessa cultura no Estado e sua dinâmica no decorrer dos anos.

2.1.5 Mapeamento Digital de Solos - MDS

Em virtude da grande extensão territorial do Brasil, a carência de informações básicas do ambiente e o alto custo dos levantamentos tradicionais dos recursos naturais, tais como os solos, torna-se necessário a utilização de tecnologias modernas para a execução dos levantamentos de solos específicos e em escalas de publicação adequadas para cada atividade a ser desenvolvida. Segundo Coelho e Giasson (2010), além de possibilitarem a extrapolação da informação das classes de solos para áreas não mapeadas, as utilizações de métodos de mapeamento supervisionados possibilitam a produção de mapas com baixo custo-benefício, em razão do alto custo para elaboração de mapas em escalas maiores pelo método convencional. Da mesma forma, Figueiredo et al. (2008) destacaram que os levantamentos pedológicos utilizando métodos tradicionais são exequíveis apenas em pequenas áreas, pois envolvem um alto custo, a grande demanda de tempo e trabalho e a necessidade de recursos humanos especializados. Segundo Höfig et al. (2014), o fato do mapeamento digital de solos (MDS) utilizar informações digitais de relevo, aumenta a viabilidade da execução dos levantamentos de solos. Basher (1997), indica que a evolução da pedologia se dará com a utilização de novas tecnologias para aquisição de dados e informações sobre os solos e para elaboração de mapas pedológicos, situação observada atualmente onde diversos estudos são desenvolvidos utilizando sistema de informação geográfica e sensoriamento remoto.

Segundo Lagacherie e McBratney (2007) o Mapeamento Digital dos Solos (MDS) pode ser definido como a criação de sistemas de informações espaciais de solo, criado a partir de modelos numéricos para a inferência das variações espaciais e temporais dos tipos e propriedades de solos, a partir de observações e do conhecimento dos solos e de variáveis ambientais correlacionadas.

Segundo McBratney et al. (2003), o modelo de formação dos solos desenvolvido por Jenny (1941), é uma função (S) do clima (cl); organismos (o); relevo (r); material de origem (p) e tempo (t), conforme equação 1 e pode ser considerado como um modelo mecânico.

$$S = f (cl,o,r,p,t) \quad \text{Eq. 1}$$

McBratney et al. (2003) propuseram uma adaptação deste modelo para possibilitar descrições quantitativas empíricas da relação entre o solo e outros fatores espacialmente referenciados, de forma a possibilitar a sua utilização na predição da ocorrência espacial dos solos. Com isso os autores incluíram o próprio solo como um fator, uma vez que o solo pode ser previsto a partir de suas propriedades, ou as propriedades podem ser preditas a partir das classes de solos ou outras propriedades, e o fator espacial, considerando que o solo pode ser predito a partir de informações ambientais da sua vizinhança. O modelo proposto foi denominado de “SCORPAN” e é apresentado na equação 2.

$$Sc = f (s,c,o,r,p,a,n) \quad \text{Eq.2}$$

Onde a classe do solo (Sc) é uma função do solo (s); clima (c); organismos (o); relevo (r); material de origem (p); tempo (a) e posição espacial (n).

De acordo com Dalmolin e Ten Caten (2015), a publicação de McBratney et al. (2003) estabeleceu um novo paradigma ao propor para o MDS o modelo SCORPAN, elaborado com base no modelo determinístico empírico dos fatores de formação do solo proposto por Jenny (CLORPT), onde os solos (classes e atributos) podem ser preditos quantitativamente como funções espaciais, utilizando as novas tecnologias existentes.

O mapeamento digital de solos estabelece relações estatísticas ou matemáticas entre as covariáveis ambientais e as classes de solos para a predição da distribuição espacial das classes ou propriedades do solo. Com isso, o mapeamento digital de solos possibilita reproduzir mapas elaborados por levantamentos tradicionais ou extrapolar informações regionais de solos para áreas onde não existam levantamentos disponíveis (Giasson et al., 2013; Giasson et al., 2015).

Diversos trabalhos têm comprovado a eficiência no mapeamento de solos de maneira automatizada e com auxílio de avaliações em campo e técnicas de modelagem pedomorfogeológica (Ippoliti et al., 2003; Demattê et al., 2004; Sirtoli et al., 2008; Zhu et al., 2010; Lacerda e Barbosa, 2012, Bazaglia Filho et al., 2013; Arruda et al., 2013, Calderano Filho et al., 2013, Vasques et al., 2014; Höfig et al, 2014, entre outros). Segundo Machado (2002) na área de mapeamento e classificação de solos, o papel dos mapas pedológicos analógicos está sendo rapidamente substituído pela tecnologia computacional para armazenamento de dados pontuais e espaciais.

Um outro exemplo da utilização de tecnologias é a análise digital do terreno, que permite o delineamento de unidades de solo-paisagem de maneira rápida e econômica, podendo ser aplicada na quantificação e classificação do relevo, proporcionando ainda a definição automática ou semi-automática das unidades morfológicas da paisagem (Moore et al., 1993; Irvin et al., 1997). Estes modelos podem ser integrados a outros tipos de dados como geologia e cobertura das terras, para obtenção de relações geopedológicas e geomorfopedológicas associadas à estratificação das classes de solos.

Sousa Junior e Demattê (2008) caracterizaram unidades de mapeamento de solos das regiões de Ibaté e São Carlos, SP, desenvolvidos de materiais basálticos e areníticos, em função da declividade e altitudes, utilizando modelos digitais de elevação, aumentando a acurácia do mapeamento de solos, diminuindo custos e tempo, quando comparado aos métodos tradicionais.

Por sua vez, Ippoliti et al. (2005), afirmam que a análise digital de terreno além de ser uma ferramenta capaz de avaliar o relevo, por meio do modelo digital de terreno (MDT), é uma alternativa rápida e econômica, o que permite a definição semiautomática das unidades morfológicas da paisagem. Enfatizam ainda que os principais atributos topográficos usados são: a elevação, a declividade, a orientação e a curvatura da superfície terrestre. Segundo os autores os métodos que organizam a superfície de acordo com um modelo morfológico apresentam potencial para melhorar a predição de ocorrência dos tipos de solos, considerando o fato da posição da paisagem influenciar os processos de formação dos solos e seus atributos. Com isso, os autores propuseram um procedimento para a extração de informação morfológica para fins de mapeamento pedológico utilizando dados digitais de elevação e Sistema de Informação Geográfica (SIG). Foi feita a análise quantitativa da superfície de uma microbacia localizada no Córrego Ipiúna, município de Viçosa (MG), visando à identificação e classificação das geoformas da paisagem e a sua associação com as classes de solos.

Segundo Demattê et al. (2011), inúmeros trabalhos são realizados na caracterização de solos por meio de associações com feições do relevo e rede de drenagem e com o surgimento do sensoriamento remoto espectral são observados trabalhos que utilizam a energia refletida para a caracterização dos solos. Os autores realizaram a caracterização dos solos da região de Piracicaba, estado de São Paulo, utilizando diferentes metodologias: método tradicional; associações com aspectos da paisagem, obtidos por intermédio da utilização de fotografias aéreas e por imagens de satélite; além das relações com as classes de declividade e de altitude, derivados de modelos digitais de terreno. Concluíram que os métodos de forma isolada não possibilitam a distinção de diferentes classes de solo, mas que a interpretação associando todas as informações possibilita observar padrões de distribuição de solos.

Silva Júnior et al. (2012), também utilizaram a classificação numérica e o modelo digital do terreno para identificar padrões condicionados pelas formas do relevo, de forma a

caracterizar a variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de Latossolos e Argissolos no município de Catanduva, Estado de São Paulo.

Pode-se citar, também, o trabalho de Pinheiro et al. (2012) que avaliaram modelos digitais de terreno (MDT) para derivar variáveis morfométricas utilizadas em mapeamento digital de solos na Bacia Hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, onde concluíram que há maior qualidade em modelos por interpolação de dados primários, em comparação aos obtidos por sensores remotos.

A Embrapa Solos coordena a Rede Brasileira de Mapeamento Digital de Solos (Rede MDS), a qual reúne pesquisadores nessa área do conhecimento (Nolasco-Carvalho et al., 2013; Souza, 2015). Diversos estudos têm sido realizados na área de mapeamento digital de solos, com a utilização de árvores de decisão (Crivelenti et al., 2009; Giasson et al., 2011, Giasson et al., 2013; Teske et al., 2014; Höfig et al., 2014; Giasson et al., 2015), redes neurais (Chagas et al., 2010; Carvalho Junior et al., 2011; Calderano Filho et al., 2013), regressões logísticas múltiplas (Giasson et al. 2006; Figueiredo et al., 2008; Coelho e Giasson, 2010; Ten Caten et al., 2011), lógica *fuzzy* (Nolasco-Carvalho et al., 2009; Lima, 2013), krigagen (Kraemer, 2007; Valladares et al., 2009; Lima et al., 2014), geotecnologias (Demattê et al., 2004; Demattê et al., 2011; Demattê et al., 2012; Lacerda e Barbosa, 2012).

2.1.5.1 Redes Neurais Artificiais - RNA

Mendonça-Santos e Santos (2003) consideram que as redes neurais são modelos matemáticos que operam de forma semelhante ao cérebro humano. São constituídas de “neurons” conectados por canais de comunicação denominados de “connectors”. Segundo os autores os conectores possuem os dados numéricos que podem ser arranjados ou organizados em camadas. Não existe estrutura definida e os dados podem receber pesos diferentes, o que demonstra que as redes são ajustadas ou “treinadas” para responder a uma determinada demanda.

A técnica de RNA, de acordo com Paloschi et al. (2015) pode ser resumida em duas partes: a arquitetura e o algoritmo de aprendizagem e o treinamento, onde o treinamento parte do princípio que o conhecimento sobre o problema está guardado dentro dos exemplos disponíveis e expostos à rede e o algoritmo de aprendizagem cria uma generalização dos dados e memoriza o conhecimento.

Calderano Filho et al. (2013) utilizou redes neurais artificiais para a predição de classes de solos, a partir de dados de sensores remotos orbitais, atributos do terreno derivados de um modelo digital de elevação e informação da geologia local, em paisagens rurais montanhosas da Serra do Mar. Segundo os autores, com a utilização das redes neurais artificiais foi possível estabelecer com maior precisão as relações solos-paisagem da área estudada, possibilitando a obtenção de mapas pedológicos com muita coerência e semelhança aos mapas de solos convencional, apresentando porém, mais detalhes espaciais.

Já Carvalho Junior et al (2011) avaliaram a relação entre os componentes ambientais de áreas de vertentes do Rio de Janeiro utilizando redes neurais artificiais e algoritmo de máxima verossimilhança. Os mapeamentos pedológicos realizados foram comparados aos mapas de solos existentes e os autores observaram uma maior precisão no mapeamento realizado com a utilização de redes neurais artificiais.

Também por meio do uso de redes neurais artificiais (RNA), Arruda et al. (2013) geraram um mapa digital de solos (MDS) em uma área localizada no município de Barra Bonita, SP, sendo possível observar uma boa concordância entre as unidades de mapeamento delineadas pelo MDS e pelo método convencional, onde a comparação entre os pontos de referência e o mapa de solos digital evidenciou exatidão de 72%.

2.1.5.2 Árvores de Decisão - AD

Segundo Mendonça-Santos e Santos (2003), as árvores de decisão/classificação podem ser compreendidas como um tipo de chave taxonômica múltipla automatizada, onde a resposta às questões relacionadas aos atributos observados possibilita a classificação. Os autores afirmam que

a construção de uma estrutura hierárquica de regras chamada de “*decision/classification trees*”, possibilita o estudo de interações complexas entre atributos, a identificação de padrões e o reconhecimento em análises futuras.

Para Giasson et al. (2011), o mapeamento preditivo de solos, utilizando a análise de árvores de decisão, a qual divide os conjuntos de dados em blocos a partir de uma árvore, pode aumentar a precisão e eficiência do mapeamento, pela extração de relações entre os tipos de solo e as variáveis ambientais, aplicando essas relações para prever classes de solo para áreas não mapeadas.

As árvores de decisão podem ser utilizadas para o estabelecimento das relações entre as variáveis ambientais e a distribuição espacial dos solos, possibilitando a predição das unidades de mapeamento, com base nas variáveis hidrológicas e de terreno. Nas análises de árvores de decisão, as observações são inseridas no nó raiz, onde é aplicado um teste para separar essas observações em classes, determinando os grupos mais puros. Em seguida a observação passa para o próximo nó onde novamente ocorre o processo de teste até que se atinja o nó terminal. Todas as observações que atingem o mesmo nó terminal são classificados da mesma forma, assim como vários nós terminais podem definir a mesma classificação. Dessa forma observa-se que uma observação pode seguir vários caminhos para se tornar parte de uma classe em particular (Giasson et al., 2011).

Segundo Giasson et al. (2015), uma questão crítica no mapeamento digital de solos é a seleção do melhor método de amostragem dos dados para treinamento do modelo preditivo. Por este motivo os autores avaliaram dois esquemas de amostragem, utilizando a localização em relação aos limites de mapas de solo como critério. No primeiro método foram selecionados pontos localizados fora das áreas marginais aos limites das unidades de mapeamentos e no segundo os pontos estavam situados dentro das áreas marginais aos limites das unidades de mapeamento. Com a utilização de árvores de decisão para modelagem das classes utilizando os dois métodos, os autores observaram que ambos foram eficazes para reduzir o tamanho do conjunto de dados, mas não trouxeram vantagens para o mapeamento digital de classes de solos.

Höfig et al. (2014) testaram metodologias de mapeamento digital de solos (MDS) e avaliaram a possibilidade de extrapolação de mapas entre áreas fisiograficamente semelhantes. Os autores avaliaram o uso combinado de dois modelos de árvore de decisão (AD) e observaram que a extrapolação dos mapas gera resultados satisfatórios, com acurácia maior do que 75% e que o uso conjunto de dois modelos de árvores de decisão, divididos por paisagens homogêneas, melhora a concordância entre o mapa digital e o convencional de solos.

Cinco algoritmos de árvores de decisão e três modelos digitais de elevação (MDE) foram testados por Giasson et al. (2013) para o mapeamento digital de solos a nível semidetalhado na Bacia do Lageado Grande, RS, Brasil. Os resultados mostraram que o uso do MDE Aster GDEM e árvore de decisão com algoritmo J48, Simple Tree e BF Tree foram os que produziram modelos capazes de produzir mapas de solos com maior similaridade ao mapa de referência.

Já o estudo de Teske et al. (2014), comparando os efeitos de diferentes modelos digitais de elevação (MDEs) na predição de ocorrência de unidades de mapeamento de solos (UM) por meio de árvores de decisão, correlacionaram 12 atributos do terreno derivados de diferentes MDEs, com resoluções de 30 e 90 m. Os autores concluíram que os modelos preditivos mais acurados e com maior número de UM estimadas foram os gerados a partir dos MDEs com resolução espacial de 90 m, sendo os mais indicados em áreas onde predominarem relevos planos e suave ondulados.

A eficácia do uso de árvores de decisão na predição de ocorrência de unidades de mapeamento de solos em áreas de encostas basálticas no Sul do Brasil foi avaliada por Giasson et al. (2011). Os autores utilizaram mapas de solos com a legenda original e a legenda simplificada para testar combinações de tipos de algoritmos de árvore de decisão e quantidade de elementos nos nós terminais. Além da eficácia da utilização de árvores de decisão, foi observado que o menor número de elementos no nó terminal produziu acurácias mais altas e a simplificação da legenda (agregação) reduziu a precisão das predições.

2.1.5.3 Regressões Logísticas Múltiplas - RLM

Segundo Figueiredo et al. (2008), tem crescido o interesse acerca do emprego de regressões nominais logísticas como método preditivo da distribuição de solos, uma vez que essas regressões estabelecem relações matemáticas entre variáveis dependentes discretas (classes de solos) e variáveis independentes contínuas ou discretas (atributos de terreno). Os autores avaliaram o potencial das regressões nominais logísticas em prever a ocorrência e distribuição de classes de solos dos municípios de Ibirubá e Quinze de Novembro (RS) e concluíram que as mesmas apresentaram potencial preditivo para serem usadas como ferramentas no mapeamento supervisionado de solos, uma vez que serviram para calcular a probabilidade de ocorrência de cada classe de solo, onde o mapa final foi produzido atribuindo-se a cada célula a denominação da classe de solo com maior probabilidade de ocorrência.

Uma vez que as unidades de mapeamento dos solos são variáveis categóricas, a regressão logística múltipla pode ser adequada para a predição da ocorrência de classes de solos a partir de variáveis da paisagem, com a vantagem de permitir associar a predição com probabilidades de ocorrência das unidades de mapeamento de solos (Giasson et al., 2006).

Coelho e Giasson (2010) utilizaram sistemas de informações geográficas e de variáveis geomorfométricas para produção de mapas pedológicos com legenda original e simplificada. Os autores compararam métodos de classificação em estágio único (Regressões Logísticas Múltiplas Multinomiais e Bayes) e em estágios múltiplos (Classification and Regression Trees - CART, J48 e Logistic Model Trees - LMT) e observaram que os métodos de classificação em estágio múltiplo apresentaram melhoras nas acurácias globais e nos índices Kappa.

Regressões Logísticas Múltiplas como modelos preditores dos solos foram utilizadas por Ten Caten et al. (2011), que observaram que as Regressões Logísticas Múltiplas possibilitam gerar mapas de probabilidade de ocorrência de classes de solo na paisagem e que a técnica de modelos lineares generalizados se mostrou sensível à proporção relativa das amostras utilizadas

para gerar os modelos, indicando que aplicações sistemáticas de RLM ao MDS deverão considerar o agrupamento (associação ou inclusão) das classes de solo pouco representativas, de menor ocorrência.

Giasson et al. (2006), também utilizaram regressões logísticas múltiplas na predição de ocorrência de classes de solos a partir de áreas de referência, com base no mapa disponível de solos e parâmetros do terreno derivados do modelo numérico do terreno. Os autores observaram que os parâmetros do terreno como elevação, distância dos rios, acúmulo de fluxo e índice de umidade topográfica foram as variáveis que melhor explicaram a distribuição das classes de solos e que a simplificação da legenda aumentou a precisão do método.

2.1.5.4 Regressão Linear Múltipla - RLM

A regressão linear múltipla considera que existe uma relação linear entre uma variável dependente (variável resposta) e uma ou mais variáveis independentes (variáveis explicatórias, regressoras ou preditoras). A análise de regressão possibilita explorar as formas dessas relações, proporcionando sua utilização em mapeamentos digitais de solos, uma vez que possibilita inferir relações causais entre as variáveis dependentes e independentes (Berk, 2004).

Pinheiro (2015) avaliou a capacidade das Regressões Lineares Múltiplas (RLM), Árvores de Regressão (AR) na predição de componentes da fração mineral na superfície dos solos, da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, RJ. Os resultados mostraram que os modelos apresentaram similaridade de desempenho. Observou-se, também, que os produtos gerados possibilitam o conhecimento das incertezas associadas a predição e facilitam a reprodutibilidade dos procedimentos, além de proporcionarem informações para decisões quanto ao uso e manejo dos solos.

2.1.5.5 Lógica *Fuzzy*

Segundo Mendonça-Santos e Santos (2003) a lógica e os conjuntos nebulosos (*fuzzy*) trata-se de uma técnica utilizada em pedometria para lidar de uma maneira quantitativa com a imprecisão, a qual, introduzida por Zadeh, (1965), trabalha com conceitos não exatos, onde as classes são indefinidas e com limites indeterminados (conceitos não exatos).

Zadeh (1965) relatam que os conjuntos *fuzzy* podem ser definidos como uma classe de objetos com graus de associação contínua. Tal conjunto é caracterizado pela função de pertinência (característica), que atribui a cada objeto uma nota de associação que varia entre zero e um.

Para Mendonça-Santos e Santos (2003), essa técnica representa uma evolução da lógica Booleana (verdadeiro ou falso), onde um indivíduo pertence ou não pertence a uma determinada classe, para um conceito mais amplo onde um indivíduo pode pertencer totalmente, parcialmente ou não pertencer, onde o grau de pertinência pode variar entre 0 e 1. Segundo os autores esses conceitos e técnicas têm sido aplicados na ciência dos solos e em várias outras áreas do conhecimento.

Nolasco-Carvalho et al. (2009) elaboraram o mapa digital de solos de uma área na região de Mucugê, BA, utilizando dados da vegetação e da geologia, integrados em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas) sob inferência *fuzzy*. Os autores observaram que a modelagem por lógica *fuzzy*, utilizando dados preexistentes relacionados aos fatores de formação dos solos e o conhecimento dos especialistas, possibilitou a predição de unidades de mapeamentos e mapas digitais com refinamento da escala. Além disso, os autores observaram, também, uma menor generalização das classes de solo, a operacionalização e redução das etapas dos trabalhos de campo e a possibilidade de maior agilidade no processo de atualização futura de mapas, em razão da facilidade de integração de informações.

2.1.5.6 Pesos de evidência

A técnica de modelagem espacial pesos de evidência (WofE - *Weights of Evidence*) é utilizada para gerar as melhores estimativas de valores para as associações espaciais entre os fatores condicionantes ou evidências e determinado evento, onde esses valores representam a probabilidade de ocorrer um evento quando da presença de um condicionante (Bonham-Carter, 1994).

Salazar (2015) ressalta que o método dos pesos de evidência se baseia no teorema de probabilidade condicional de Bayes, onde a probabilidade de ocorrer um evento A, está condicionada ou dependente da ocorrência de outro evento B.

Segundo Perrota (1996), no método “Bayesiano”, a combinação de um conjunto de dados (ou mapas) é feita utilizando-se uma estrutura de probabilidades, as quais são medidas mediante proporções entre as áreas dos mapas de evidência e o das ocorrências.

Correia et al. (2013) aplicaram a técnica de pesos de evidência para o mapeamento de áreas com suscetibilidade natural a deslizamentos na região do baixo vale do Itajaí, SC. Os autores concluíram que os mapas finais coincidem com os pontos de treinamento, atestando os bons resultados da classificação, onde o modelo alcançou 74,56% de acurácia.

Já Galvão e Meneses (2005) aplicaram a técnica estatística de inferência espacial de pesos de evidência integrada à Sistema de Informação Geográfica para a identificação de um subconjunto de variáveis geoambientais preditivas do processo de elaboração de mapas potenciais para locação de estações fluviométricas na bacia do rio São Francisco. Segundo os autores, o processo usado na modelagem com pesos de evidência constitui, em sua essência, uma versão quantitativa do método de sobreposição e inspeção de diversos mapas temáticos, com vistas à identificação de áreas onde um determinado fenômeno ou evento possa estar presente.

Perrota (1996) utilizou o método de modelagem de indexação de *overlays* e pesos de evidência para estudar o potencial aurífero de uma área no distrito mineiro do Vale do Rio Ribeira de Iguape. O autor identificou coincidência entre os dois tipos de modelagem utilizados, onde os modelos mostraram áreas com potencial aurífero ainda não prospectadas, muitas vezes com índices de favorabilidade mais altos em relação às áreas com depósitos já avaliados, estabelecendo-se assim prioridades para explorações futuras.

2.1.5.7 Krigagem

Segundo Carvalho e Assad (2005) os métodos de krigagem são considerados metodologias geoestatísticas de interpolação, uma vez que utilizam a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima. Devido a essas características os autores consideram que a krigagem é um excelente estimador e apontam como principal diferencial dos interpoladores geoestatísticos a realização da correlação espacial entre observações vizinhas para prever valores em locais não-amostrados. Para Landim (2003) a krigagem é um processo de estimação de valores de variáveis distribuídas no espaço a partir de valores adjacentes, considerados como espacialmente dependentes pelo semivariograma. Já Angelico (2006) considera que a krigagem faz uma descrição mais acurada da estrutura espacial dos dados e produz valiosa informação sobre a distribuição da estimativa do erro.

A distribuição espacial de dados físico-químicos a fim de analisar o comportamento desses parâmetros nos ambientes de manguezal, apicum e encosta da parte norte do município de Madre de Deus, localizado na Bahia, foi avaliada por Assumpção et al. (2013) por meio da krigagem. Os resultados comprovaram a eficiência da krigagem na espacialização de dados geoquímicos, facilitando a obtenção de informações por intermédio do uso de dados georreferenciados.

A comparação da eficiência da interpolação de dados por meio da krigagem ordinária (Kri) e pelo inverso do quadrado da distância (IQD) na estimativa de atributos químicos do solo, no município de Alegre (ES), em Argissolo Vermelho-Amarelo foi realizada por Souza et al. (2010). A análise geoestatística mostrou que todos os atributos químicos do solo apresentaram dependência espacial, os métodos de interpolação foram eficientes na inferência de dados para os atributos químicos analisados e não houve diferenças significativas entre os métodos de interpolação utilizados.

2.2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGELICO, J. C. Desempenho da co-krigagem na determinação da variabilidade de atributos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.6, p.931-936, 2006.
- ARRUDA, G. P.; DEMATTÊ, J. A. M.; CHAGAS, C. S. Mapeamento digital de solos por redes neurais artificiais com base na relação solo-paisagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.327-338, 2013.
- ASSUMPÇÃO, H. C. P.; UCHA, J. M.; HADLICH, G. M. Uso da Krigagem para variáveis ambientais no município de Madre de Deus – BA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, 16, 2013, Foz do Iguaçu, **Anais... INPE**, Foz do Iguaçu, 2013, p.6636-6642.
- BARROS, M.A. **Geotecnologias como contribuição ao estudo do Agroecossistema cafeeiro de Minas Gerais em nível municipal**. 2006. 157p. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP.
- BARROS, M. A.; MOREIRA, M. A.; RUDORFF, B. F. T. Dados interferométricos para modelagem topográfica e caracterização ambiental do café em escala municipal. **Sociedade & Natureza**, v.19, n.2, p.33-50, 2007.

- BASHER, L. R. **Is pedology dead and buried?** *Australian Journal of Soil Resource*, n.35, p.979-994, 1997.
- BAZAGLIA FILHO, O.; RIZZO, R.; LEPSCH, I. F.; PRADO, H.; GOMES, F. H.; MAZZA, J. A.; DEMATTÊ, J. A. M. Comparison between detailed digital and conventional soil maps of an area with complex geology. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p.1136-1148, 2013.
- BERNARDES, T.; MOREIRA, M. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T. Diagnóstico físico-ambiental da cafeicultura no estado de Minas Gerais – Brasil. **Coffee Science**, Lavras, v.7, n.2, p. 139-151, 2012.
- BERK, A. R. **Regression Analysis: A constructive critique**. London: Sage Publications, 2004. 259p.
- BONHAM-CARTER, G.F. **Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS**. Ottawa: Pergamon, 1994. 398p.
- BORÉM, F. M. **Protocolo de identidade, qualidade e rastreabilidade para embasamento da indicação geográfica dos cafés da Mantiqueira**. In: BORÉM, F. M. (coord.). Relatório Final de Prestação de Contas. Edital CNPq/MAPA/SDA Nº 064/2008. Lavras: UFLA, 2012. 128p.
- BRESSANI, E. **Guia do Barista. Da origem do café ao expresso perfeito**. Local: Café Editora, 2007. 210p.
- CALDERANO FILHO, B.; POLIVANOV, H.; CHAGAS, C. S.; GUERRA, A. J. T.; JUNIOR, W. C. Predição de Classes de Solos de Paisagens Montanhosas da Serra do Mar, com o Uso de Redes Neurais Artificiais (RNAs). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 16, 2013, Foz do Iguaçu, **Anais...** INPE, Foz do Iguaçu, 2013. p.3916-3923.

- CAMPOS, D. S. **Análise da variabilidade espacial da produtividade da cafeicultura de montanha com uso de técnicas de sensoriamento remoto**. 2005. 50p. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- CARVALHO JUNIOR, W.; CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; VIEIRA, C. A. O.; SCHAEFER, C. E. G.; BHERING, S. B.; FRANCELINO, M. R. Digital soilscape mapping of tropical hillslope areas by neural networks. **Scientia Agricola**, v.68, n.6, p.691-696, 2011.
- CARVALHO, J. R. P; ASSAD, E. D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no Estado de São Paulo: comparação de métodos de interpolação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.2, p.377-384, 2005.
- CARVALHO, C. H. S. **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília: Embrapa Café, 2008. 334 p.
- CHAGAS, C.S.; FERNANDES FILHO, E.I.; VIEIRA, C.A.O.; SCHAEFER, C.E.G.R.; CARVALHO JÚNIOR, W. Atributos topográficos e dados do Landsat7 no mapeamento digital de solos com uso de redes neurais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.5, p.497-507, 2010.
- COELHO, F. M. G. O café num outro retrato do Brasil rural: o lugar da agricultura familiar. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, Edição especial. v.26, p.9-16, 2005.
- COELHO, F. F.; GIASSON, E. Métodos para mapeamento digital de solos com utilização de sistema de informação geográfica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.10, p.2099-2106, 2010.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Café, Safra 2015 – Quarto Levantamento**. Brasília: CONAB, 2015.

- CORREIA, M. R. D.; NOGUEIRA, R. E.; SOUZA FILHO, C. R.; POZZOBON, M. Aplicação da técnica Pesos de Evidência (*Weights of Evidence* - WofE) para o mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos na região do baixo vale do Itajaí–SC. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, 16, Foz do Iguaçu, **Anais...** INPE, Foz do Iguaçu, 2013, p.6010-6017.
- CRIVELENTI, R. C.; COELHO, R. M.; ADAMI, S. F.; OLIVEIRA, S. R. M. O. Mineração de dados para inferência de relações solo-paisagem em mapeamentos digitais de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.12, p.1707-1715, 2009.
- DALMOLIN, R. S. D.; TEN CATEN, A. Mapeamento Digital: nova abordagem em levantamento de solos. **Investigación Agraria**, v.17, n.2, p.77-86, 2015.
- DEMATTÊ, J. A. M.; GENUÍ, A. M.; FIORIO, P. R.; ORTIZ, J. L.; MAZZA, J. A.; LEONARDO, H. C. L. Comparação entre mapas de solos obtidos por sensoriamento remoto espectral e pelo método convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.12, p.1219-1229, 2004.
- DEMATTÊ, J. A. M.; RIZZO, R.; BORTOLETTO, M. A. M. Método geotecnológico integrativo na caracterização de solos desenvolvidos de diferentes materiais de origem. **Bragantia**, Campinas, v.70, n.3, p.638-648, 2011.
- DEMATTÊ, J. A. M.; VASQUES, G. M.; CORRÊA, E. A.; ARRUDA, G. P. Fotopedologia, espectroscopia e sistema de informação geográfica na caracterização de solos desenvolvidos do Grupo Barreiras no Amapá. **Bragantia**, Campinas, v.71, n.3, p.438-446, 2012.
- FIGUEIREDO, S. R.; GIASSON, E.; TORNQUIST, C. G.; NASCIMENTO, P. C. Uso de regressões logísticas múltiplas para mapeamento digital de solos no Planalto Médio do RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.32, n.esp., p.2779-2785, 2008.

- GALVÃO, W. S.; MENESES, P. R. Identificação de variáveis geoambientais preditivas ao processo de locação de estações fluviométricas com o apoio do Modelo de Pesos de Evidência. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, 12, Goiânia, **Anais...** INPE, Goiânia, 2005, p.2169-2176.
- GIASSON, E.; INDA JUNIOR, A. V.; NASCIMENTO, P. C. Estimativa do benefício econômico potencial de dois levantamentos de solos no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.2, p.478-486, 2006.
- GIASSON, E.; SARMENTO, E. C.; WEBER, E.; FLORES, C. A.; HASENACK, H. Decision trees for digital soil mapping on subtropical basaltic steepplands. **Scientia Agricola**. v.68, n.2, p.167-174, 2011.
- GIASSON, E.; HARTEMINK, A. E.; TORNQUIST, C. G.; TESKE, R.; BAGATINI, T. Avaliação de cinco algoritmos de árvores de decisão e três tipos de modelos digitais de elevação para mapeamento digital de solos a nível semidetalhado na Bacia do Lageado Grande, RS, Brasil. **Ciência Rural**, v.43, p.61-67, 2013.
- GIASSON, E.; TEN CATEN, A.; BAGATINI, T.; BONFATTI, B. Instance selection in digital soil mapping: a study case in Rio Grande do Sul, Brazil. **Ciência Rural**, v.45, n.9, p.1592-1598, 2015.
- HÖFIG, P.; GIASSON, E.; VENDRAME, P. R. S. Mapeamento digital de solos com base na extrapolação de mapas entre áreas fisiograficamente semelhantes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.49, n.12, p.958-966, 2014.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Indicadores IBGE. **Estatística da Produção Agrícola**. Abril de 2015.
- INPI – INSTITUTO NACIONAL DE PROPRIEDADE INDUSTRIAL. **Pedidos de indicação geográfica concedidos e em andamento**. Disponível em:

<http://www.inpi.gov.br/menu-servicos/indicacao-geografica/pedidos-de-indicacao-geografica-no-brasil>. Acessado em 2 jul.2016.

IPPOLITI, G.; COSTA, L. M.; GAGGERO, M. R.; SCHAEFER, C. E.; FILHO, E. I. F. Uso de Geoprocessamento para levantamento preliminar de solos em uma microbacia na Zona da MATA (MG). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE. 2003, p.153-160. CD ROM.

IPPOLITI, G. A. R.; COSTA, L. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES FILHO, E. I.; GAGGERO, M. R. Análise digital do terreno: ferramenta na identificação de pedoformas em microbacia na região de “Mar de Morros” (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.269-276, 2005.

IRVIN, B. J.; VENTURA, S. J.; SLATER, B. K. Fuzzy and isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant Valley, Wisconsin. **Geoderma**, Amsterdam, v.77, n.2/4, p.137-154, 1997.

JENNY, H. **Factors of soil formation, a system of quantitative pedology**. McGraw- Hill: New York, 1941. 281p.

KRAEMER G. B. **Variabilidade espacial dos atributos do solo na delimitação das unidades de mapeamento**. 2007. 87p. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

KHATOUNIAN, C. A.; SOARES-JÚNIOR, D. Abordagem sistêmica e pesquisa participativa na agricultura familiar: ferramentas para o desenvolvimento. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.26, p.17-27, 2005.

LACERDA, M. P. C.; BARBOSA, I. O. Relações Pedomorfogeológicas e Distribuição de Pedoformas na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.709-721, 2012.

- LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. In: LAGACHERIE, P. et al. **Digital soil mapping: an introductory perspective**. Amsterdam: Elsevier, 2007. Cap. 1, p.3-22.
- LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2ª. Edição, São Paulo: Editora Unesp, 2003. 253p.
- LIMA, G. C.; SILVA, M. L. N.; OLIVEIRA, M. S.; CURI, N.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA, A. H. Variabilidade de atributos do solo sob pastagens e mata atlântica na escala de microbacia hidrográfica **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.5, p.517–526, 2014.
- MACHADO, M. L. **Caracterização de agroecossistemas cafeeiros da Zona da Mata de Minas Gerais, usando Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas**. 2002. 137p. (Dissertação de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- MACHADO, M. L.; ALVES, H. M. R.; VIEIRA, T. G. C.; FERNANDES FILHO, E. I.; LACERDA, M. P. C. Mapeamento de áreas cafeeiras (*Coffea arabica* L.) da Zona da Mata Mineira usando sensoriamento remoto. **Coffee Science**, Lavras, v.5, n.2, p.113-122, 2010.
- MCBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**. Amsterdam, v.117, p.3-52, 2003.
- MELO, B.; SOUSA, L. B. Biologia da reprodução de *Coffea arábica*. L. e *Coffea canephora* Pierre. **Revista Verde**, Mossoró, Rio Grande do Norte, v.6, n.2, p.01-07, 2011.
- MENDONÇA-SANTOS M. L.; SANTOS H. G. dos. **Mapeamento Digital de Classes e Atributos de Solos - Métodos, paradigmas e novas técnicas**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2003.19p. (Documentos, 55)

- MOORE, I. D.; GESSLER, P. E.; NIELSEN, G. A.; PETERSON, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of American Journal**, v.57, p.443-452, 1993.
- MOREIRA, M. A.; RUDORFF, B. F. T.; BARROS, MARCO A.; FARIA, V. G. C.; ADAMI, M. Geotecnologias para mapear lavouras de café nos estados de Minas Gerais e São Paulo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.6, p.1123-1135, 2010.
- NOLASCO-CARVALHO, C. C.; FRANCA-ROCHA, W.; UCHA, J. M. Mapa digital de solos: uma proposta metodológica usando inferência *fuzzy*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.1, p.46-55, 2009.
- NOLASCO-CARVALHO, C. C.; NUNES, F. C.; ANTUNES, M. A. H. Histórico do levantamento de solos no Brasil: da industrialização brasileira à era da informação. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.65/5, p.997-1013, 2013.
- PALOSCHI, R. A.; JÚNIOR, C. C.; JOHANN, J. A. Geotecnologias e redes neurais artificiais para o mapeamento da cultura de cana-de-açúcar por meio de série temporal de EVI no estado do Paraná. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 17, 2015, João Pessoa, **Anais...** INPE, João Pessoa, 2015, p.3875-3881.
- PERROTA, M. M. **Potencial aurífero de uma região no Vale do Ribeira, São Paulo, estimado por modelagem de dados geológicos, geoquímicos, geofísicos e de sensores remotos num sistema de informações geográficas**. 1996. 149p. (Tese de Doutorado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- PINHEIRO, H. S. K.; CHAGAS, C. S.; CARVALHO JÚNIOR, W.; ANJOS, L. H. C. Modelos de elevação para obtenção de atributos topográficos utilizados em mapeamento digital de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.9, p.1384-1394, 2012.
- PINHEIRO, H. S. K. **Métodos de mapeamento digital aplicados na predição de classes e atributos dos solos da Bacia Hidrográfica do Rio Guapi Macacu, RJ**. 2015. 166f.

(Teses de Doutorado em Agronomia). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.

RAMIREZ, G. M.; JUNIOR, J. Z. Avaliação da resposta espectral de plantios de café (*Coffea arabica*) nas imagens LANDSAT/TM E QUICKBIRD. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal, **Anais...** INPE, Natal, 2009, p.339-345.

REIS, P. R. **Café Arábica do plantio à colheita**/Paulo Rebelles Reis, Rodrigo Luz da Cunha. – Lavras: U.R. EPAMIG SM, 2010. 1 v., 896p.

RIBEIRO, D. E. **Interação genótipo e ambiente na composição química e qualidade sensorial de cafés especiais em diferentes formas de processamento**. 2013. 62p. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

SALAZAR, J. P. C. **Determinação de cenários futuros de uso e cobertura do solo e sua influência na vulnerabilidade ambiental: o caso do Município de Formosa – GO**. 2015. 112p. (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

SALES JÚNIOR, S. G. **Avaliação de variedades de café (*Coffea arabica* L.) no município de Barra do Choça, estado da Bahia**. 2006. 96p. (Dissertação de Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA.

SILVA, A. V. L. **Clima e qualidade natural de bebida de café na região mogiana do estado de São Paulo**. 2010. 58p. (Dissertação de Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical). Campinas: Instituto Agrônômico, Campinas, SP.

SILVA JÚNIOR, J. F.; SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Classificação numérica e modelo digital de elevação na caracterização espacial de atributos dos solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.4, p.415-424, 2012.

- SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T.; MANTOVANI, L. E.; SIRTOLI, A. R. A.; OKA-FIORI, C. Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.9, n.3, p.317-329, 2008.
- SOARES, S. C. **Distribuição da cafeicultura em parte do Estado do Espírito Santo, em relação às variáveis morfométricas e tipos de solos, usando dados de sensoriamento remoto**. 2012. 99p. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP.
- SOUSA JUNIOR, J. G. A.; DEMATTÊ, J. A. M. Modelo digital de elevação na caracterização de solos desenvolvidos de basalto e material arenítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.449-456, 2008.
- SOUZA, F. F.; SANTOS, J. C. F.; COSTA, J. N. M.; SANTOS, M. M. **Características das principais variedades de café cultivadas em Rondônia**. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2004. 21p.
- SOUZA, G. S.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C.; ROCHA, W. S. D. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.11, n., p.73-81, 2010.
- SOUZA, V. C. O.; VIEIRA, T. G. C.; VOLPATO, M. M. L.; ALVES, H. M. R. Espacialização e dinâmica da cafeicultura mineira entre 1990 e 2008, utilizando técnicas de geoprocessamento. **Coffee Science**, Lavras, v.7, n.2, p.122-134, 2012.
- SOUZA, R. Q. **Pedomorfogeologia e mapeamento digital de solos com horizonte B textural e B nítico em uma área piloto no planalto central do Brasil**. 2015. 143p. (Dissertação de Mestrado). Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. regressões logísticas múltiplas: fatores que influenciam sua aplicação na predição de classes de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.1, p.53-62, 2011.

- TESKE, R.; GIASSEN, E.; BAGATINI, T. Comparação do uso de modelos digitais de elevação em mapeamento digital de solos em Dois Irmãos, RS, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.5, p.1367-1376, 2014.
- TRABAQUINI, K.; MIGLIORANZA, E.; FRANÇA, V.; NETO, O. C. P. Uso da geotecnologia para caracterizar os cafezais no município de Londrina-PR, em relação à altimetria, declividade e tipo de solo. **Engenharia Agrícola**, v.30, n.6, p.1136-1147, 2010.
- TRABAQUINI, K.; MIGLIORANZA, E.; FRANÇA, V.; NETO, O. C. P. Caracterização de lavouras cafeeiras, utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, no município de Umuarama – PR. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.35, n.1, p.35-44, 2011.
- VALLADARES, G. S.; AZEVEDO, E. C.; CAMARGO, O. A.; GREGO, C. R.; RASTOLDO, A. M. C. S. Variabilidade espacial e disponibilidade de cobre e zinco em solos de vinhedos e adjacências. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.3, p.733-742, 2009.
- VASQUES, G. M.; DEMATTÊ, J. A. M.; ROSSEL, R. A. V.; RAMÍREZ-LÓPEZ, L.; TERRA, F.S. Soil classification using visible/near-infrared diffuse reflectance spectra from multiple depths. **Geoderma**. Amsterdam, v.223-225, p.73-78, 2014.
- VIEIRA, T. G. C.; ALVES, H. M. R.; BERTOLDO, M. A.; SOUZA, V. C. O. Geotechnologies in the assessment of land use changes in coffee regions of the state of Minas Gerais in Brazil. **Coffee Science**, Lavras, v.2, n.2, p.142-149, 2007.
- ZADEH, L. A. *Fuzzy sets*. **Information and Control**. v.8, p.338-353, 1965.
- ZHU, A.X.; YANG, L.; LI, B.; QIN, C.; PEI, T.; LIU, B. Construction of membership functions for predictive soil mapping under fuzzy logic. **Geoderma**, v.155, p.164-174, 2010.